



Accordo di Programma MiSE-ENEA



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

**RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO**



## Studio di sistemi innovativi di accumulo termico

Adio Miliozzi, Giuseppe Mauro Giannuzzi  
ENEA, UTRINN-PCI

Workshop - Roma, 27 Maggio 2015



## Solare Termodinamico Obiettivo generale



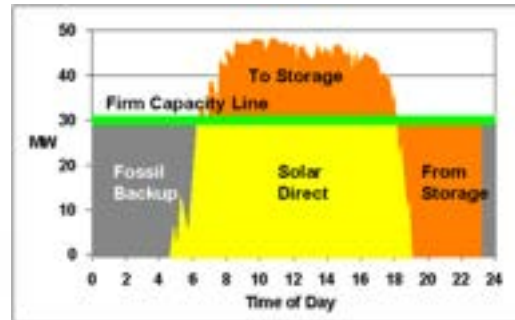
Rendere l'energia solare a concentrazione competitiva con le altre forme di energia  
(\$0.21/kWh nel 2010 → \$0.06/kWh nel 2020)

## Il Sistema di Accumulo Energia Termica (TES)

Il Sistema TES è una opzione che permette di accumulare energia termica per renderla disponibile in periodi successivi.

### Vantaggi:

- stabilizzare la produzione dell'impianto in condizioni di variabilità della sorgente (nuvole, radiazione solare ridotta),
- spostare la produzione in periodi più favorevoli (rispondere a picchi e/o vendere a tariffe più convenienti),
- estendere l'operatività dell'impianto anche in periodi dove il sole è assente (incremento del fattore di utilizzo) senza ricorrere a combustibili fossili
- ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>



(calore di processo, energia elettrica)

### Sforzo innovativo (obiettivi)

temperature operative  
200 - >600 C

efficienze > 95%

costo TES  
15-20\$/kWh.

### Svantaggi:

- incremento dei costi sia capitale che operativi e di manutenzione

# Classificazione dei sistemi di accumulo termico

## intervallo di temperatura operativo

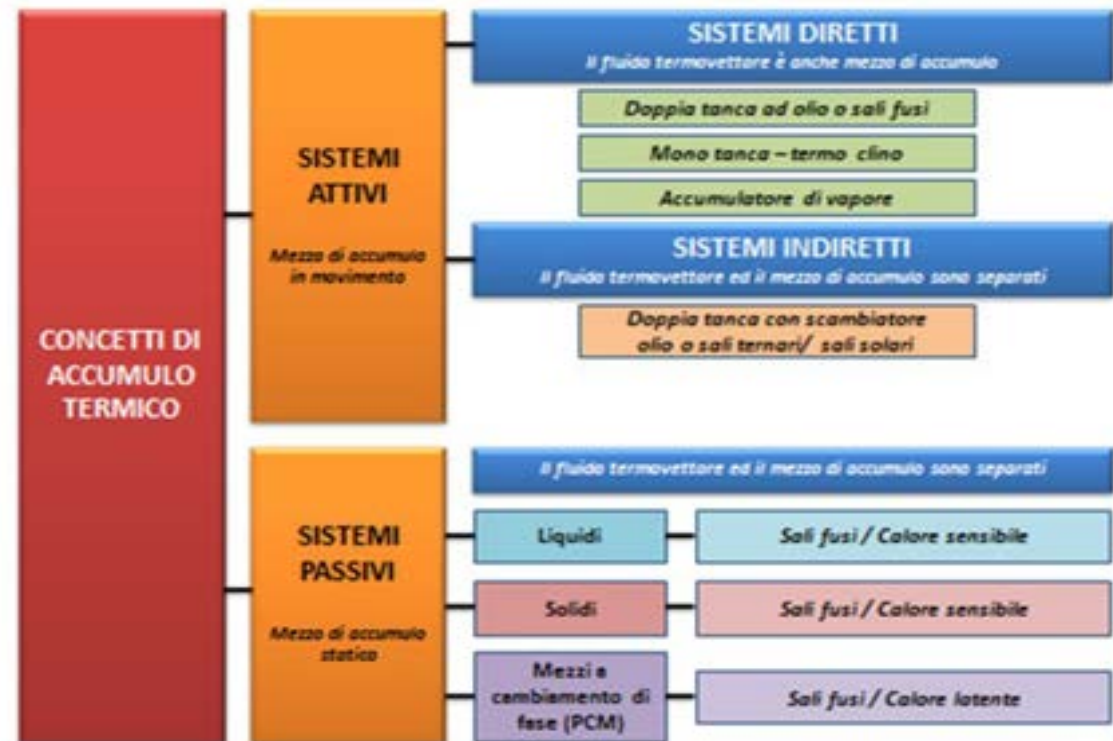
- **HTTES** (*High temperature thermal energy storage*) : oltre i 300°C.
- **MTTES** (*Medium temperature thermal energy storage*) : 150°C- 300°C.
- **LTTES** (*Low temperature thermal energy storage*) : 10°C-150°C.
- **CTES** (*Cold temperature thermal energy storage*) : sotto i 20°C.

## Durata dell'accumulo

- breve termine,
- lungo termine
- stagionale.

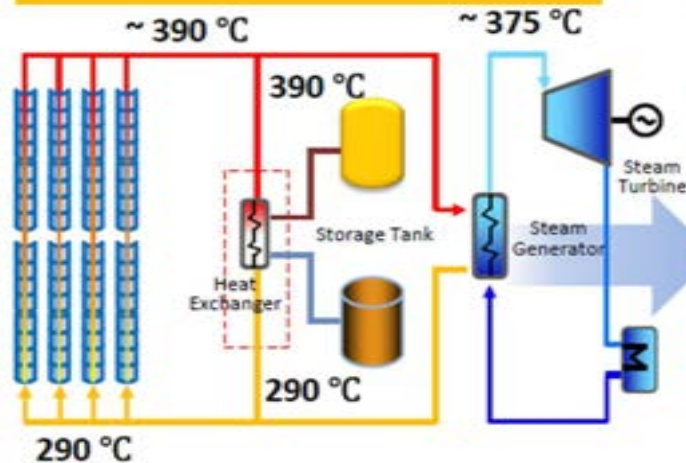
## metodo di accumulo di calore:

- ✓ **Calore sensibile (SHTES)**  
sono quelli più commerciali e di comune utilizzo. Richiedono grandi volumi, hanno un importante impatto ambientale e costi elevati.
- ✓ **Calore latente (LHTES)**  
elevata densità di energia accumulata, ridotte dimensioni e costi. Necessita di ricerca per risolvere alcune problematiche come ad esempio la bassa diffusività termica dei materiali di accumulo. Buone prospettive nel medio-breve periodo.
- ✓ **Termochimico (TCES)**  
i valori più elevati di densità energia accumulata, in fase di ricerca iniziale. Competitivi nel lungo periodo.



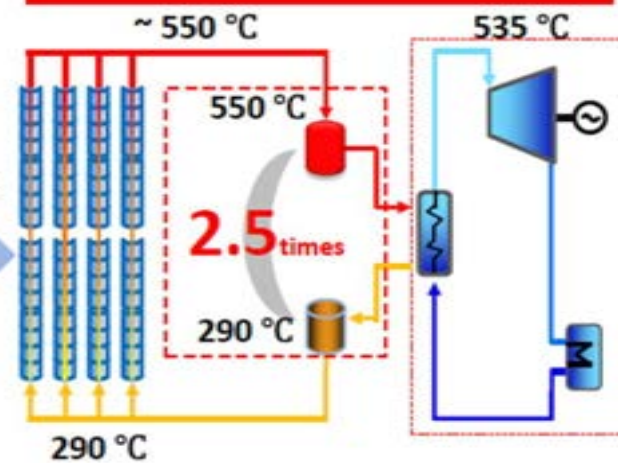
# L'accumulo termico nella tecnologia ENEA

Schema impianto CSP a olio e sali fusi



- Fluido termovettore : olio diatermico
- Mezzo di accumulo : sali fusi
- Temp. Oper. Min-Max: 290-390 C
- Salto termico : 100 C
- TES: attivo, indiretto, calore sensibile, a doppio serbatoio con scambiatore

Schema impianto CSP a sali fusi - ENEA (2001)



- Fluido termovettore : sali fusi
- Mezzo di accumulo : sali fusi
- Temp. Oper. Min-Max: 290-550 C
- Salto termico : 260 C
- TES: attivo, diretto, calore sensibile, a doppio serbatoio

## Risultati tecnologia ENEA:

- ridurre le dimensioni del sistema di accumulo termico incrementando la differenza di temperatura del ciclo termico;
- eliminare lo scambiatore di calore tra HTF e sistema di accumulo (accumulo di tipo diretto)

## Costi del TES

Accumulo indiretto olio-sale solare	60-80 \$/kWh
Accumulo diretto con sale solare	30-40 \$/kWh
Target dichiarato	15-20 \$/kWh (2020)

## Nuove soluzioni tecnologiche per:

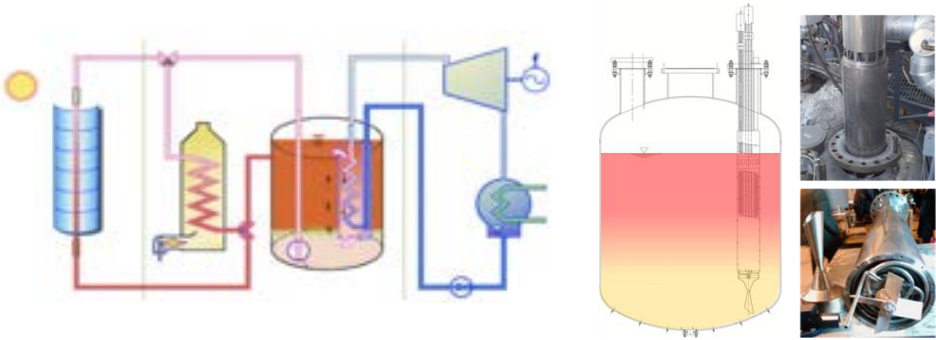
- Ridurre il costo dei componenti
- Ridurre le dimensioni del TES
- Aumentare la densità di energia accumulata



### Sistemi di accumulo a Media e Alta Temperatura

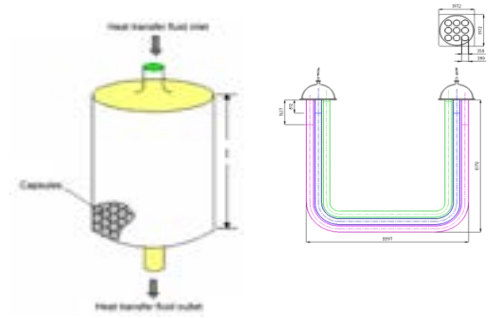
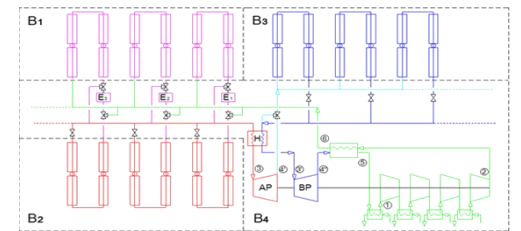
Calore Sensibile  
Alta Temperatura (550 C)

Sali fusi : serbatoio unico, GV integrato



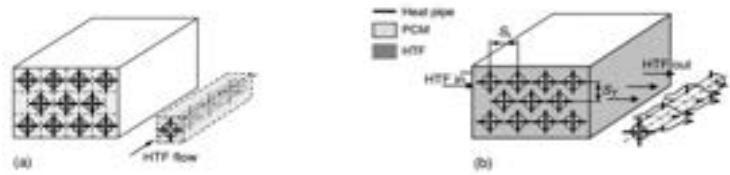
Calore Sensibile  
Alta Temperatura (550 C)

Impianto solare a collettori parabolici lineari con fluido gassoso e accumulo termico a materiale solido.  
Ciclo di Brayton.  
Accumulo: indiretto, passivo  
Mezzo di accumulo: sfere di allumina



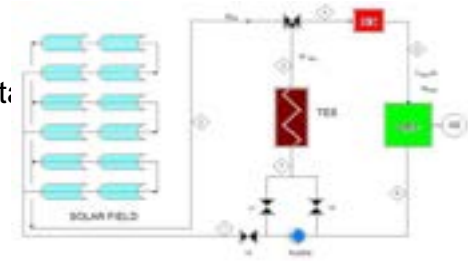
Calore Latente  
Media Temperatura (150-300 C)

Impianti di piccola taglia in multi-generazione (ORC, Cooling, acqua sanitaria, ...). Calore di processo.  
Impianti con olio diatermico, acqua, ...  
Mezzo di accumulo: Sali nitrati con nanoparticelle  
Elevata densità di energia accumulata



Calore Sensibile  
Media Temperatura (150-300 C)

Mezzo di accumulo: cemento  
Basso costo del mezzo di accumulo  
Possibile incremento della capacità termica tramite PCM



### TES a calore latente (LHTES-MTTES)

Sfruttare il calore latente di fusione per aumentare la capacità termica del HSM

*1 kg di sali solari,  $\Delta T = 100\text{ C}$   $\rightarrow$  170 kJ di calore sensibile*

*Se avviene un cambio di fase solido-liquido  $\rightarrow$  + 110 KJ di calore latente*

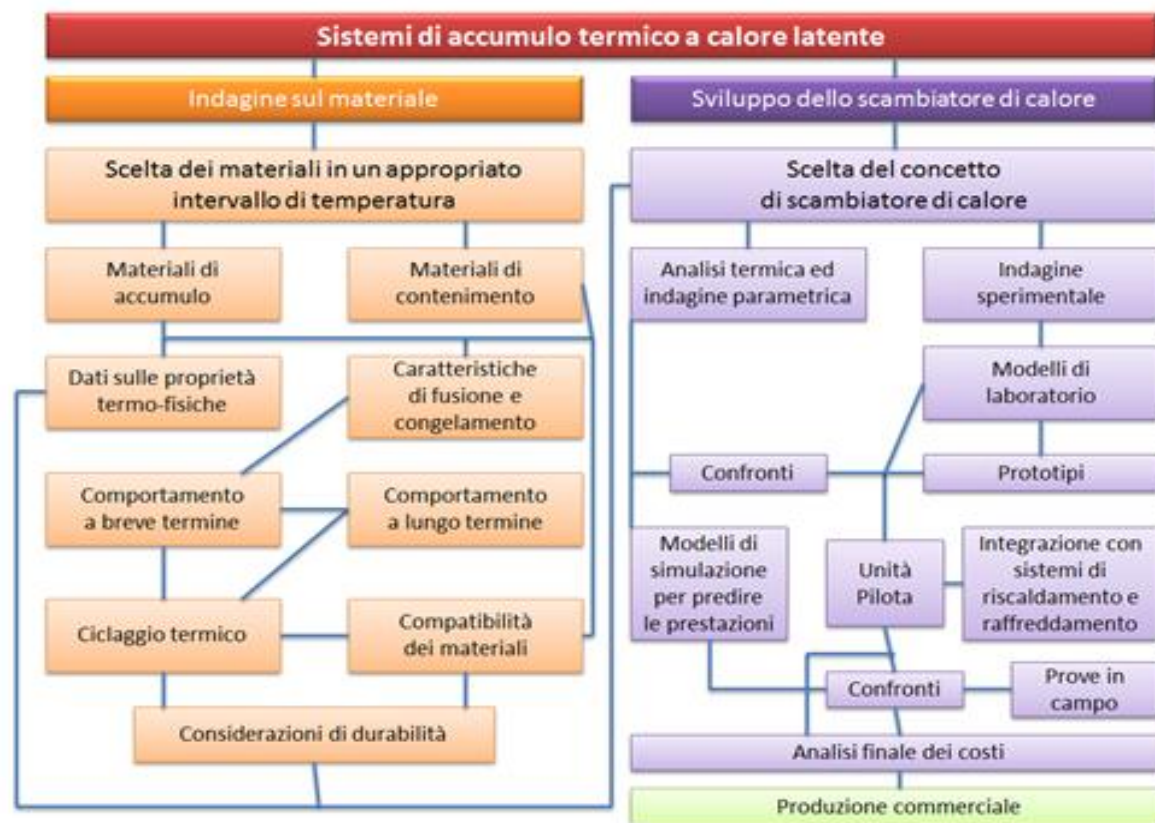
*La capacità di accumulo del mezzo è quasi raddoppiata.*

LHTES: tipo passivo e indiretto

Tre componenti principali:

- un **mezzo di accumulo** (PCM), la cui temperatura di cambiamento di fase sia in accordo con la temperatura del fluido termovettore;
- un **sistema di contenimento** opportuno, compatibile con il PCM;
- una **superficie di scambio termico** (scambiatore di calore) che garantisca un efficiente trasferimento di calore tra fluido termovettore e PCM e viceversa.

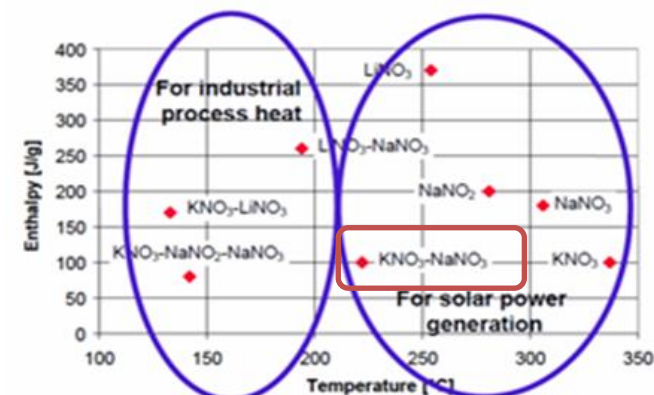
Lo sviluppo di un LHTES passa attraverso lo studio e la progettazione di ciascuno di questi componenti.



### LHTES: Materiali a cambiamento di fase (PCM)

Proprietà **termofisiche**, **cinetiche**, **chimiche** ed economiche.

- Temperatura di cambiamento di fase appropriata all'intervallo di temperature desiderato;
- Elevato calore latente per unità di massa;
- Elevato calore specifico;
- Elevata conducibilità termica sia in fase solida che liquida;
- Stabilità (bassa variazione di densità) durante il cambio di fase ;
- Elevata densità;
- Piccole variazioni di volume;
- Bassa pressione di vapore.
- Sotto-raffreddamento limitato od assente durante il congelamento;
- Sufficiente rateo di cristallizzazione.
- Stabilità chimica;
- Nessuna decomposizione chimica;
- Compatibilità con i materiali di contenimento;
- Non velenoso, non infiammabile e non esplosivo.
- Abbondante;
- Disponibile;
- A basso costo.



**$KNO_3-NaNO_3$  Sali Solari :**

**Basso costo, Elevata capacità termica, Bassa conducibilità termica**

### PCM e nanoparticelle (Nano-Fluid PCM – NFPCM)

1-2%wt di particelle con dimensioni nanometriche in un liquido si ottiene un nuovo fluido (detto nanofluido) con proprietà termo fisiche «anomale» superiori a quelle previste dalla normale teoria delle miscele

- un incremento significativo della conducibilità termica e del calore specifico ;
- un trasferimento di calore più efficiente;
- una elevata stabilità alla sedimentazione a causa delle dimensioni e del peso limitati;
- una frizione ed erosione delle superfici dei condotti trascurabili.



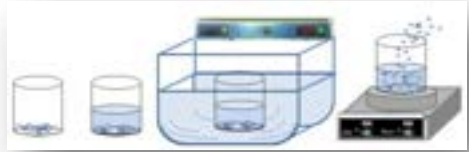


# Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

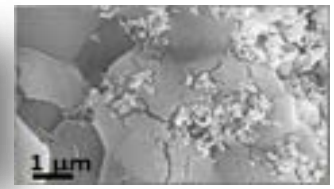
## Accumulo termico a calore latente: studio dei materiali

PCM	NFPCM
miscela di sali NaNO <sub>3</sub> -KNO <sub>3</sub> (60:40)	Sali + 1% SiO <sub>2</sub>
	Sali + 1% TiO <sub>2</sub>
	Sali + 1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Sali + 1% SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (86% silica -14% alumina)

**1 metodo:**  
**Miscelazione in soluzione acquosa**  
Dispersione in bagno ultrasuoni e evaporazione



**2 metodo:**  
**Miscelazione ad alta temperatura**  
Miscelazione in un estrusore bivate co-rotante



**NFPCM MIGLIORE : 1wt% SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

- Buona dispersione nanoparticelle
- Incremento calore specifico: 57-22% (solido-liquido)
- La T fusione diminuisce di 10°C
- Il calore di fusione ΔH aumenta del 15%

- Buona dispersione a 300°C, 200rpm, 30 min
- Incremento del calore specifico (18-21%)
- Il calore di fusione ΔH aumenta del 2%
- Tempi più brevi per la produzione del nanofluidi

### Produzione di NFPCM (SS+1wt.% SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in grandi quantità (15kg per sperimentazione)



**1 metodo:**  
**Miscelazione ad alta temperatura**



**2 metodo:**  
**Miscelazione in soluzione acquosa**



**Miscelazione con 3 agitatori diversi:**

- 1) DISPERMAT
- 2) AGITATORE A PALETTE
- 3) MAGNETIC STIRRER



**Metodo 2:**

- Aumenta: calore specifico, calore di fusione, conducibilità termica
- Diminuisce la T fusione.
- I risultati sono stati migliori con maggiori quantità prodotte fino a 300g/L.
- Il NFPCM di 100g con AGITATORE (500rpm) ha il maggiore aumento del Cp (29%)

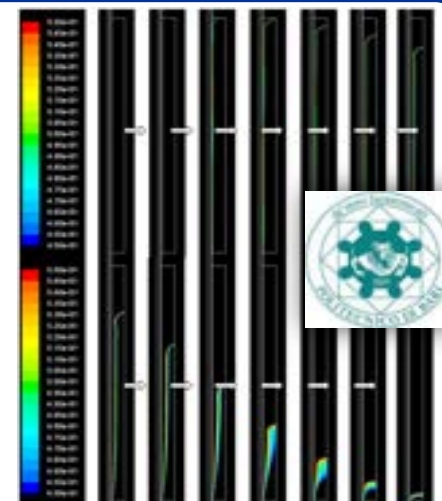
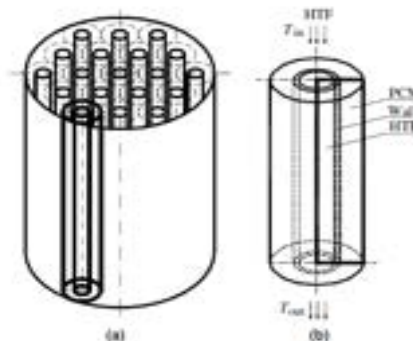


### Studio, progettazione e realizzazione di LHTES elementari

Semplice configurazione di tipo “*tube and shell*” in cui il tubo centrale può presentare un sistema di alettatura metallico.

Indagine conoscitiva sui fenomeni in gioco valutare i vantaggi e gli svantaggi

Problema : promozione della conducibilità termica



CFD - Fluent

### Studio, progettazione e realizzazione impianto ATES

#### Caratteristiche impianto

- HTF: olio diatermico Therminol66
- Sistema risc./raffr. Julabo
- T max 300 C - Portata max 10 l/min
- 2 linee di prova - 3 accumulatori in serie
- 9 termocoppie primo accumulatore
- 14 termocoppie lungo il piping
- 1 termocoppia per T parete esterna del TES
- 1 termocoppia per T ambiente
- Un misuratore di portata
- Inversione del flusso e ricircolo (4 elettrovalvole)
- Acquisizione e controllo tramite Labview

#### ATES (Advanced Thermal Energy Storage)



Nuova Steim (Narni)

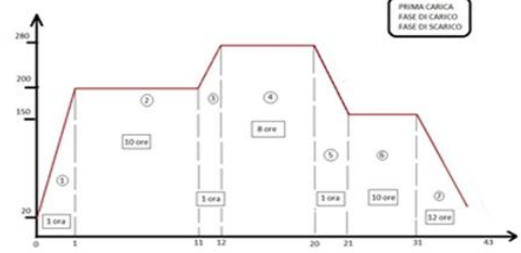


# Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

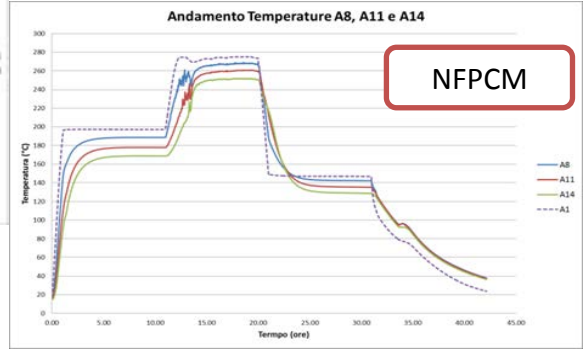
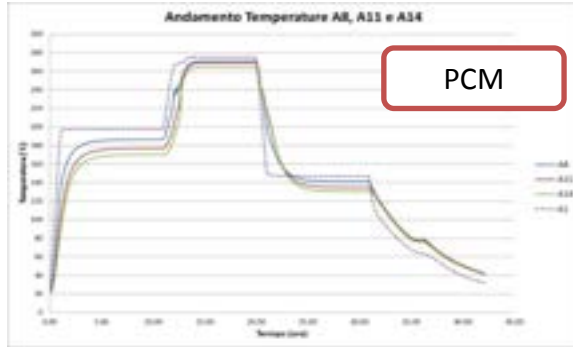
## Accumulo termico a calore latente: attività sperimentale

### Campagna sperimentale

Tipo Accumulatore	n.	Tubo	Sali solari	Nano particelle	ID Prova	n.
A	3	liscio	si	no	1	3
B	3	alettato	si	no	2	3
C	3	liscio	si	si	3	2
D	3	alettato	si	si	4	2
<b>Totali</b>	<b>12</b>					<b>10</b>



### Elaborazione ed analisi dei dati



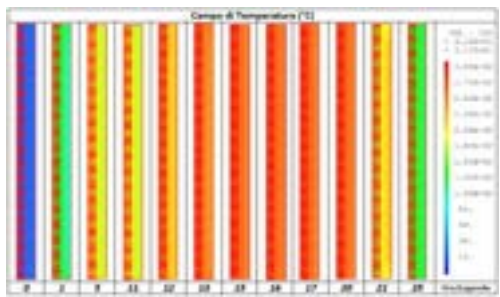
### Simulazioni numeriche e confronto numerico-sperimentale



Codice CAST3M (free – CEA Saclay Paris)

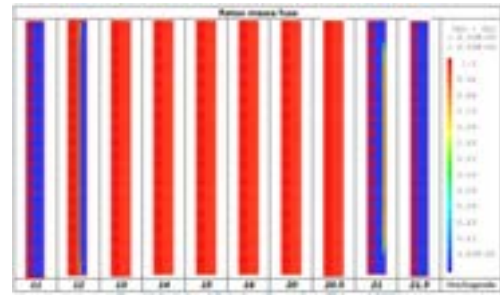
Risorse di calcolo e relativo supporto tecnico  
**CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing** (<http://www.cresco.enea.it>)  
 “CRESCO/ENEAGRID HPC” è finanziato da ENEA e da programmi di ricerca Europei.

Temperature



Analisi  
FEM  
1D, 2D

Fase liquida



### Mezzo di Accumulo

#### PCM

la bassa conducibilità (diffusività) termica è compensata, in fase liquida ed in assenza di limitazioni fisiche (alette), dall'innesco di moti convettivi che facilitano lo scambio termico.

#### NFPCM

a fronte di una sostanziale invarianza della diffusività termica, risulta incrementata la capacità termica (15-20%) e l'effusività termica.

la fase di carico è lenta (6 ore, +30%): comportamento puramente conduttivo all'interno del liquido, probabilmente dovuto alla maggiore viscosità del mezzo che ostacola l'innesco dei moti convettivi.

### Scambiatore

Tubi alettati: è evidente il ruolo di promozione della conducibilità termica esercitato dalle alette, i tempi risultano essere più contenuti e sostanzialmente indipendenti dal mezzo di accumulo;

La fase di carico della prova con tubo liscio e PCM ha tempi confrontabili con quelli dei TES con tubi alettati. Lo scambio termico è prevalente di tipo convettivo

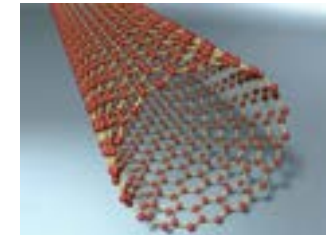
### Simulazione FEM

Le analisi (scambio termico puramente conduttivo) non tengono conto degli eventuali fenomeni convettivi nel mezzo di accumulo. Analisi CFD sarebbero più indicate, purché siano correttamente individuati i parametri di calcolo.

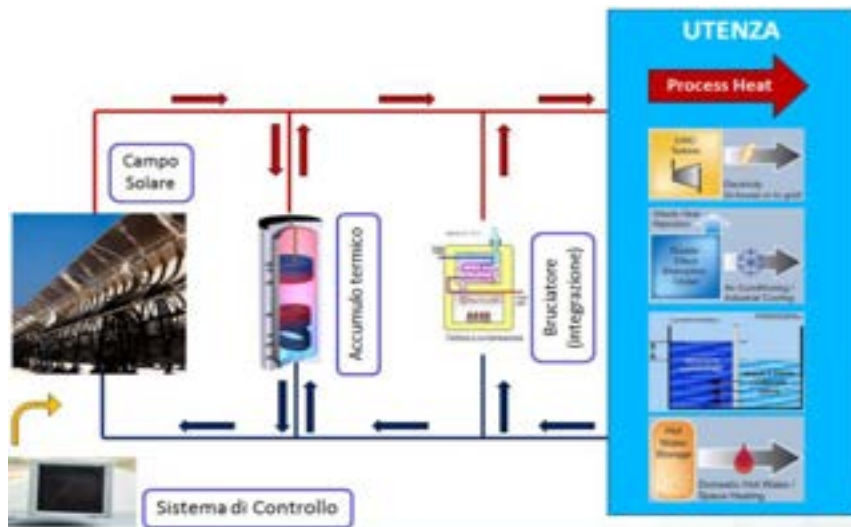
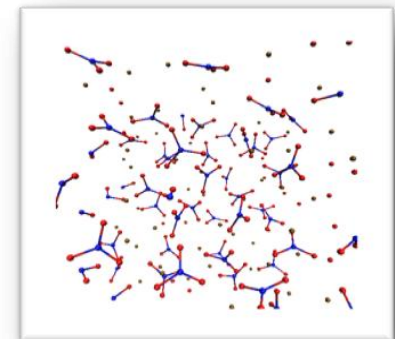
Analisi 1D e 2D : sostanzialmente equivalenti, anche se la seconda è sicuramente più precisa.

Le differenze nei bilanci energetici tra calcolo e sperimentazione sono piuttosto evidenti: superiori perdite verso l'esterno e masse in gioco nella sezione di test.

- ❑ Sviluppo di NFPCM con nanoparticelle metalliche e CNTs
- ❑ Sviluppo di cementi con capsule di PCM o NFPCM come mezzo di accumulo termico
- ❑ Analisi di durabilità dei NFPCM (ciclaggio carico-scarico)
- ❑ Simulazione dinamica molecolare: sale e nanoparticelle
- ❑ Sviluppo modelli semplificati per simulare in comportamento del LHTES
- ❑ Sviluppo metodi di analisi per integrazione impianto



Dinamica molecolare



Integrazione d'impianto





*Bari, 30 Giugno – 3 Luglio 2013*  
Effect of nanoparticles on heat capacity of phase change materials based on molten salts for thermal energy storage applications  
Manila Chieruzzi, Gian Filippo Cerritelli, Adio Miliozzi, José M. Kenny



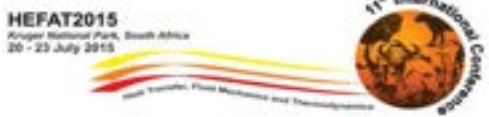
*Sevilla, 8–13 Settembre 2013*  
Phase change materials based on molten salts and nanoparticles for thermal energy storage,  
Manila Chieruzzi, Gian Filippo Cerritelli, Adio Miliozzi, José M. Kenny

**Nanoscale Research Letters. 10/2013**

Effect of nanoparticles on heat capacity of nanofluids based on molten salts as PCM for thermal energy storage,  
Manila Chieruzzi, Gian F Cerritelli, Adio Miliozzi and José M Kenny



*Venezia, 24-26 Nov. 2014*  
Use of nanoparticles for enhancing the heat capacity of nanofluids based on molten salts as phase change materials for thermal energy storage  
Manila Chieruzzi, Adio Miliozzi, José M. Kenny



*20-23 Luglio 2015, South Africa*  
CFD Anlysis of melting process in a shell-and-tube latent heat storage for concentrated solar power plants,  
S.M. Camporeale, F. Fornarelli, B. Fortunato, L. Magliocchetti, A. Miliozzi, G. Santo, M. Torresi



*Roma, 9-11 Set. 2015*  
Analisi sperimentale sullo scambio termico in sistemi di accumulo passivi a calore latente utilizzando sali fusi per applicazioni in impianti solari a concentrazione.  
R. Liberatore, A. Miliozzi, T. Crescenzi, E. Veca

**Submitted to Nanoscale Research Letters**

A new phase change material based on potassium nitrate salt with silica and alumina nanoparticles for thermal energy storage  
M. Chieruzzi, A. Miliozzi, José M. Kenny



**2013 SOLTECA:** Studio concettuale e sperimentale di un modulo di accumulo termico per impianti solari termodinamici. (UNITN-UNIPD)

**Fin. CARITRO**

**2011 ELIOSLAB-OR4:** Progettazione di massima di un serbatoio conico per sali fusi a 550 °C . (ITALCEMENTI-UNIPD)

**Fin. Legge 297/99 Art. 12 – Ricerca MIUR**

**2002 UpTun:** Improving The Level Of Fire Safety In Existing Tunnels (ITALCEMENTI-UNIPD-POLIMI)

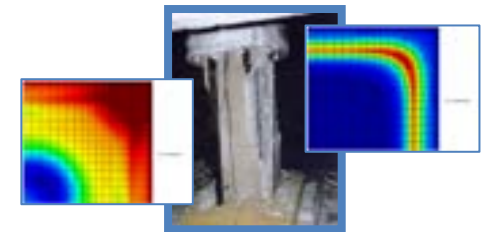
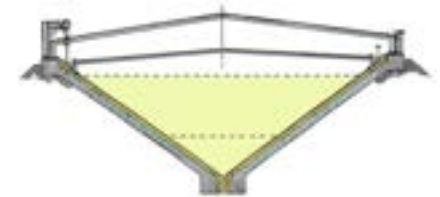
**Fin. UE 5th FWP**

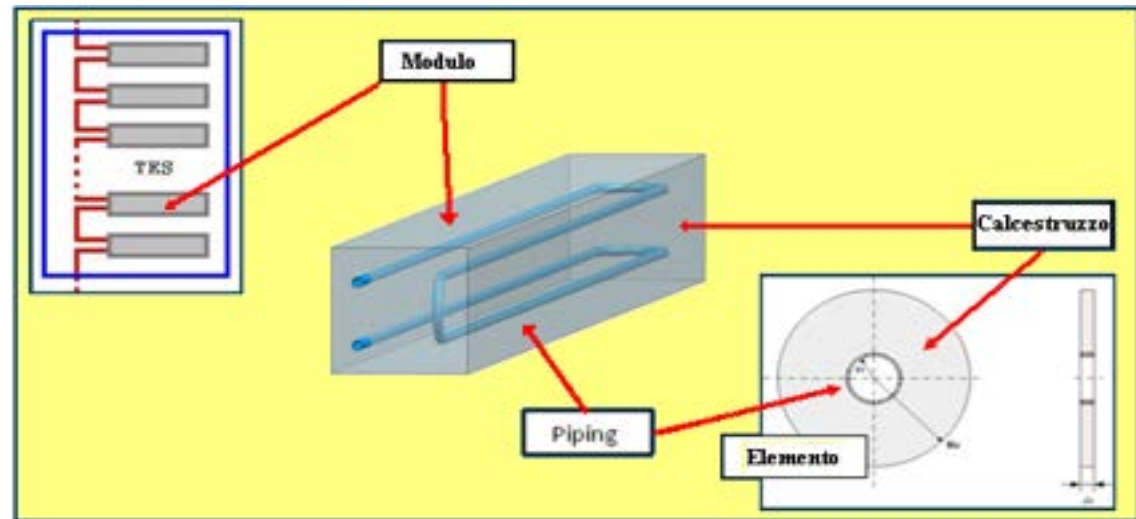
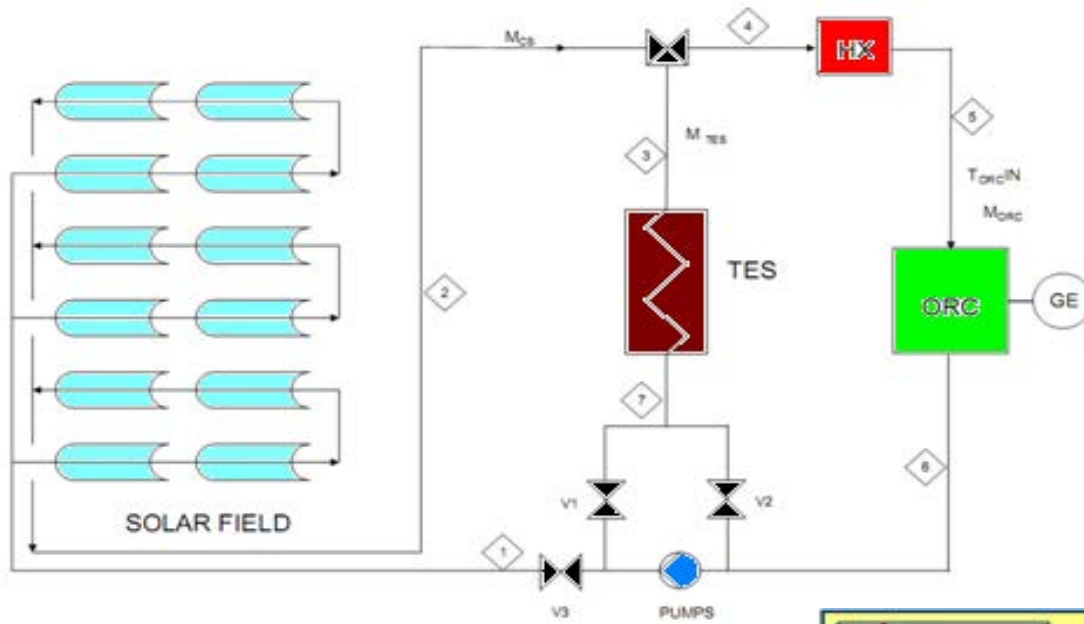
**1999 HITECO:** Understanding and industrial applications of high performance concretes in high temperatures environment (UNIPD-POLIMI)

**Fin. UE FP4**

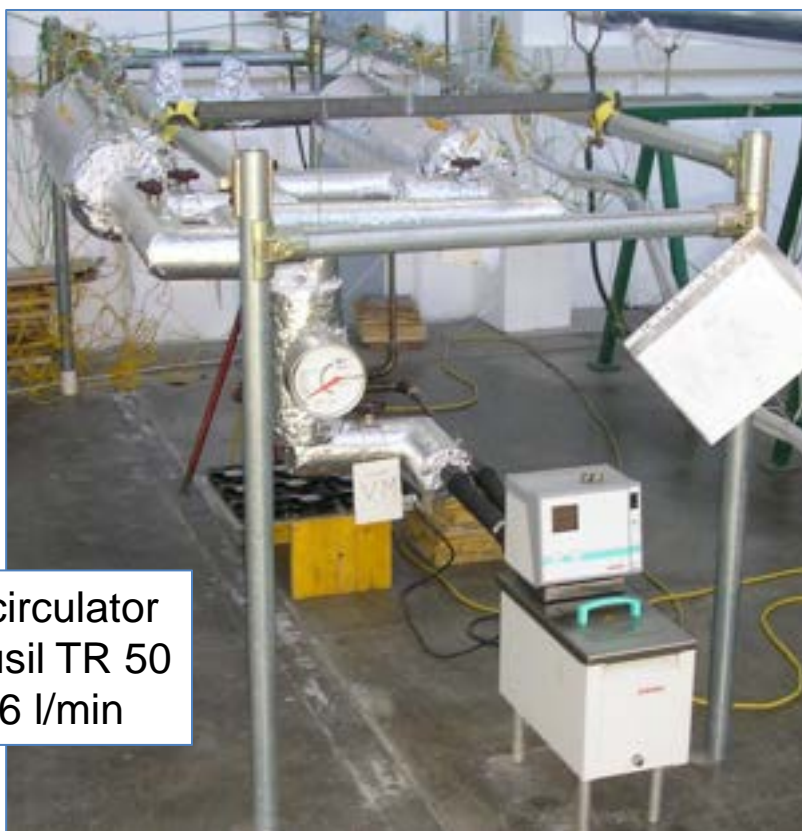
**1995 FISA- EU Research on severe accidents:** High Resistance concrete behaviour under low velocity impacts and extreme temperature (PENLY) (UNIPD-POLIMI)

**Fin- EU Council Decision 91/626 Euratom**



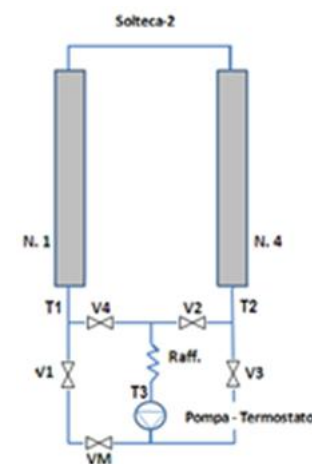


### Sperimentazione di un elemento di accumulo termico: PAR 2013



Julabo heating circulator  
Silicone Oil : Alusil TR 50  
Max: 250 C/ - 26 l/min

- Mescola a conducibilità migliorata
- Lunghezza elemento 1 m

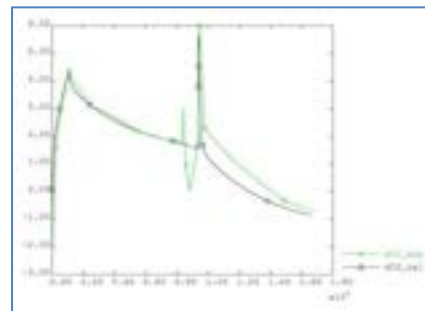
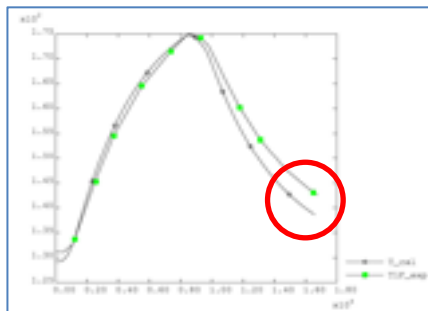
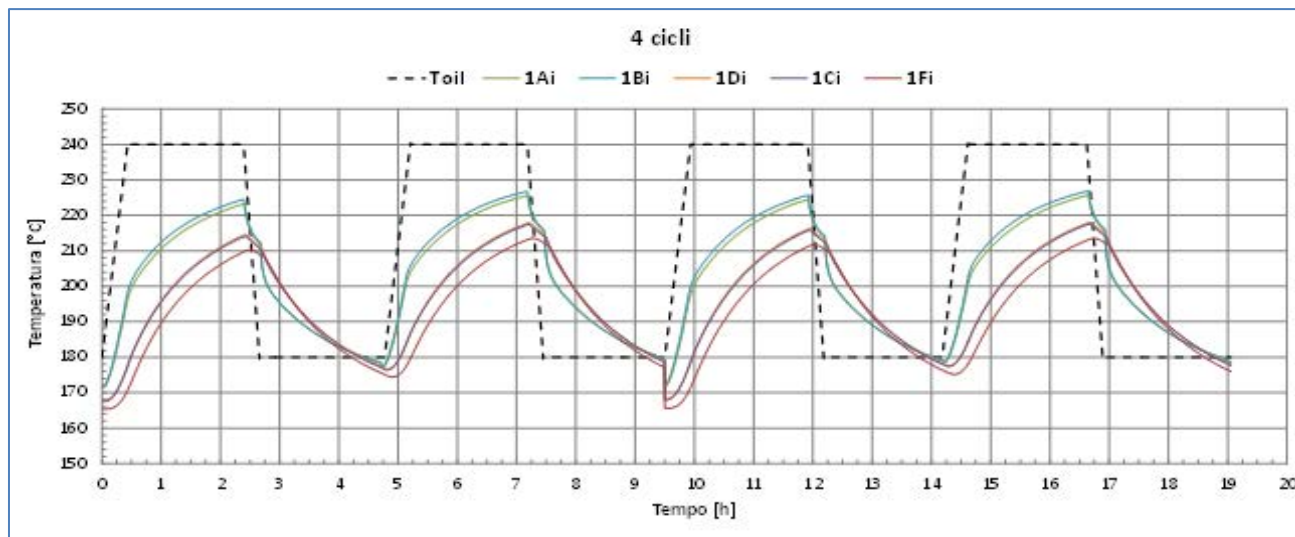


Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e Meccanica



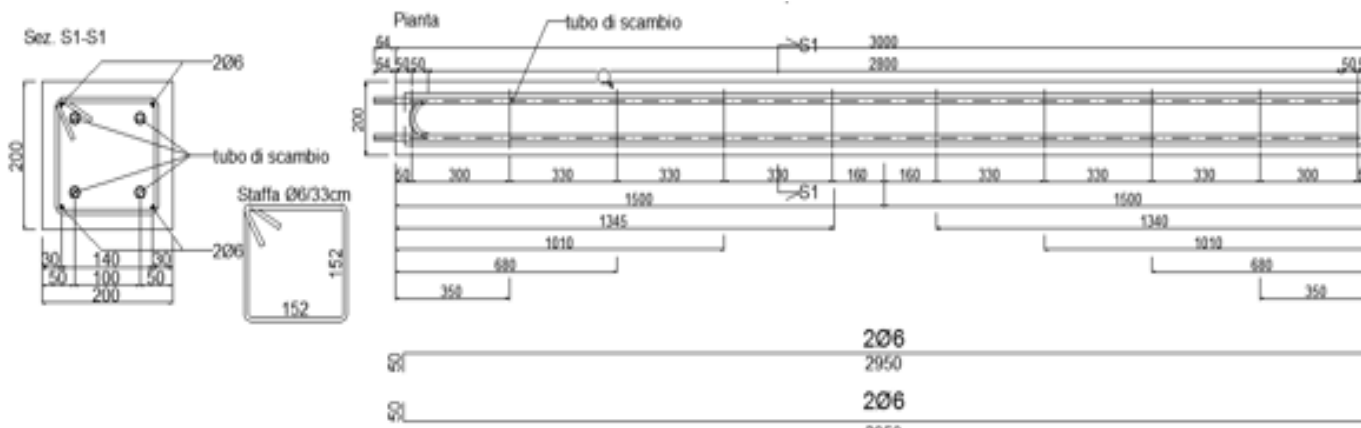
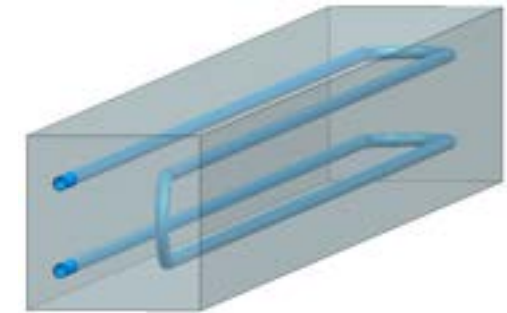
### Sperimentazione di un elemento di accumulo termico: PAR 2013



### Attività in corso

*Si è sviluppato e verrà testato un nuovo prototipo di modulo di accumulo di calore di maggiori dimensioni e con struttura simile a quella prevista per applicazioni industriali.*

*E' stato effettuato il dimensionamento strutturale e termoidraulico del modulo.*



AISI 304

L: 12 m

D: 14 mm

Peso: 300 kg

En.Ac. 6,4 kWh

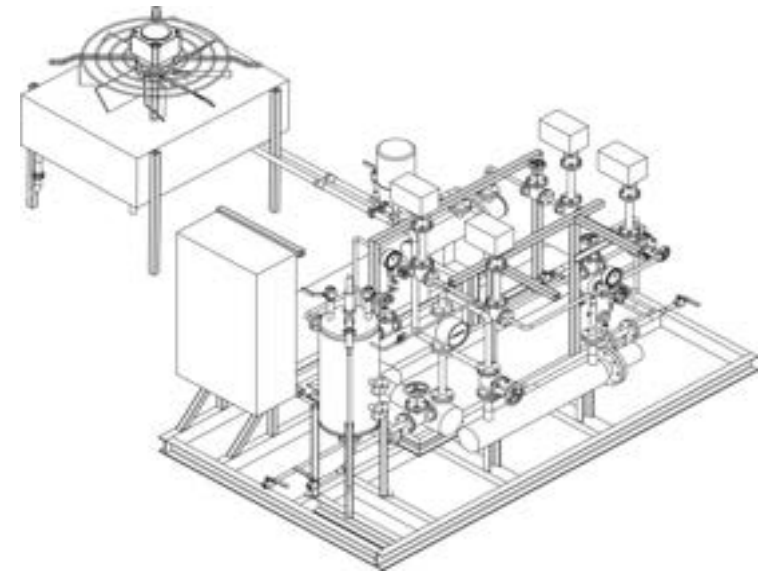
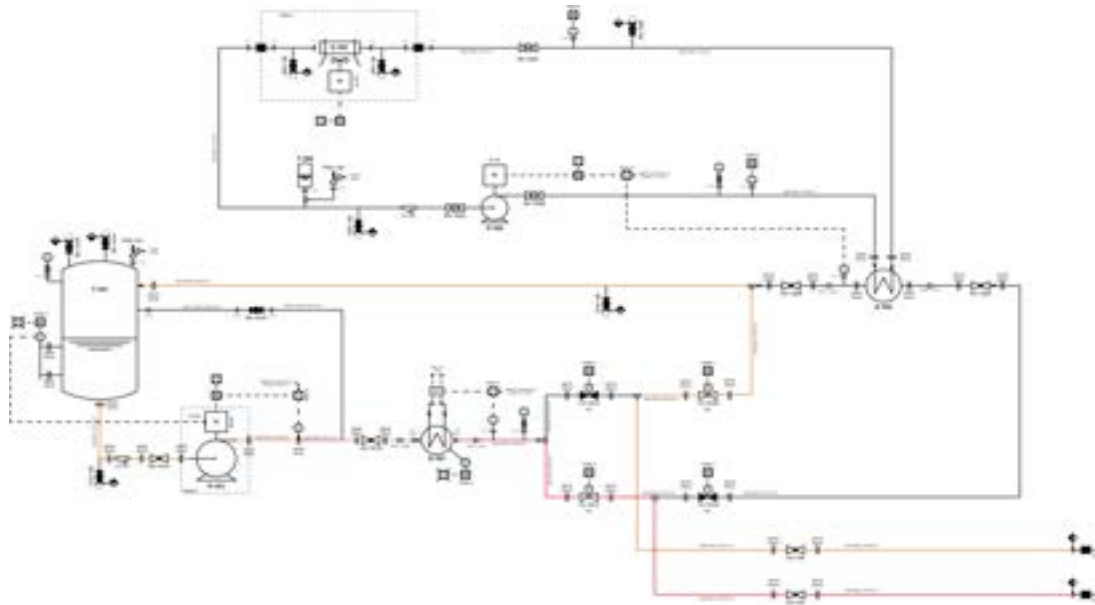
Cost. 18 €/kWh

*È in corso la realizzazione di due moduli identici, utilizzando mix differenti di calcestruzzo, uno sviluppato autonomamente dall'Italcementi, l'altro sviluppato dall'Università di Trento (UNITN) nell'ambito del PAR 2013.*

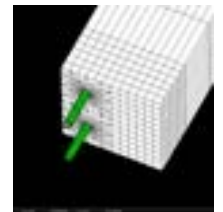
**Università di Padova**  
**Università di Trento**  
**Italcementi**

### Attività in corso

*Per la sperimentazione è stato progettato e realizzato un circuito in grado di operare alle temperature attese (~300 C), con potenza termica massima di circa 21 kW. La sperimentazione verrà effettuata presso i laboratori della Casaccia.*



*La sperimentazione sarà affiancata da un'attività di simulazione numerica, svolta prevalentemente dall'Università di Padova, mediante la quale verranno messi a punto opportuni modelli di calcolo al fine non solo di analizzare il comportamento termico del modulo, ma anche di evidenziare eventuali criticità e degrado funzionale e/o strutturale dei moduli stessi.*



- **Tesi ENEA-Università di Roma La Sapienza, 2012.** *“Studio ed analisi di sistemi di accumulo termico in materiali cementizi per impianti solari a concentrazione di piccolo taglia”*. Michele Santoro.
- **INTECH, “Engineering application of Solar Energy”**, Chapter 6: *“Conceptual Study of a Thermal Storage Module for Solar Power Plants with Parabolic Trough Concentrators”*, V. A. Salomoni, C. E. Majorana, G.M. Giannuzzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele and M. Lucentini
- **Materials and Design** 51 (2013) 989-997 – *“Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems”*, O. B. Ozger, F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C. E. Majorana, L. Fambri, N. Baldassino, R. Di Maggio.
- **Solar Energy** 103 (2014) 303-315 – *“Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants”*. V.A. Salomoni, C. E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele, M. Lucentini.



# Grazie per l'attenzione



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile

